

(17) 統計的アプローチによる沈澱池の運転方法の 形式知化に関する一考察

沼田 篤男^{1*}・渡辺 晴彦²・小泉 明³・森 正幸¹

¹ 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科/(株)日水コン (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

² (株)日水コン 中央研究所

³ 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

*E-mail: numata_a@nissuicon.co.jp

水道事業の継続的推進には、人材確保と技術継承が必要不可欠であり、水道事業の今日的課題である。運転管理の改善・維持のための技術継承には、経験知と形式知の職員間での共有とその蓄積が求められる。本稿では、沈澱池の運転方法に関する経験知を統計的アプローチにより形式知に表出できることを確認した。すなわち、相関分析により沈澱水濁度を説明する要因の抽出を行った。また、主成分分析では原水水質のパターン化によりそれぞれのパターンにおける沈澱水濁度の達成状況を把握した。さらに、回帰分析の結果、薬注率の定式化によりクリプトスポリジウム対策前後の運転操作は、薬注率の設定を原水水温の差異により変更していることが分かった。

Key Words : *effective control management, experimental wisdom, explicit knowledge, statistical approach*

1. はじめに

我が国の水道普及率は概ね 97%を超え、ライフラインとしての整備は高レベルに達し、継続的な水道事業の推進が求められている。このためには、団塊の世代の大量退職に対応した人材確保と技術継承が必要不可欠であり、水道事業の今日的課題である¹⁾。筆者等は浄水水質の良し悪しには技能職を含めた技術職員の多少が寄与していることを統計的に確認し、人材確保の重要性を示した²⁾。多くの浄水場の運転管理では、日々変化する原水水質に対し、技術職員が経験により得た知識と運転記録等を基に目標水質を確保している。このことは、水質基準の改正時等運転環境の変化に対して、職員の保有する技術が即応して安全な浄水水質を確保してきたことから分かる。この経験により得られた知識(経験知)は、運転操作の勘や施設の癖の捉え方といった職員の個性に依存するところが多く、定型的な表現(形式知)とし難い傾向がある。経験知を多く持つ技術職員は、運転管理と記録作成に時間の多くを割かれ、保有する知識を定型的表現ではなく体験として技術継承している。さらに、技術継承が不得手な技術職員を抱えている、もしくは技術職員

が不足している事業体では、このような技術継承もされ難く、技術職員の確保だけでは解決されない。このため、今後運転管理の改善・維持を行うための技術継承には、経験知と形式知を職員間で共有することがより有効となると考えられる³⁾。経験知は、職員の運転管理の経験として、形式知は経験知の表出によって蓄積される。この表出には、職員からの経験のヒアリングによる方法やヒアリングが不可能な場合にはデータによる方法がある。

1996年に国はクリプトスポリジウム暫定対策指針^{4),5)}を提示した。この暫定対策指針は、それまでのろ過水濁度の運転目安を 0.1 度以下で維持するとし、クリプトスポリジウムを濁質とともに除去しようとするものである。しかしながら、この対策指針には凝集と沈澱の運転管理に関する留意点の指摘はあるが、具体的な運転方法に関する記述はなく、その対応は事業体に委ねられている。これまでに、凝集沈澱の制御因子を精緻に組み込んだ最適運転モデルをつくるためにさまざまな試みがなされてきた^{6),7)}。最も新しい研究成果としては、(財)水道技術研究センターの産官学共同研究プロジェクトにおいて、浄水場ごとに沈澱水濁度を目的関数とした重回帰分析が

なされている⁸⁾。しかしながら、沈澱水濁度と制御因子との関係において、浄水場間に共通した一定の傾向は得られていない状況にある。これらのことから、事業体はクリプトスポリジウム暫定対策指針への対応（以下「クリプト対策」と呼ぶ）において、変動する原水水質に対するジャーテスト結果と職員が持つ知見をベースに薬注率の設定を試行錯誤し、その結果として、より安全な沈澱水濁度の維持を図るための運転方法を見出したと考えられる。実際にクリプト対策後に沈澱水濁度は改善されてきており、技術職員間に新たな運転方法の知見が醸成されていると見ることができる。残念ながら、この運転方法の変更を含めたクリプト対策に関する事例報告は見当たらない。しかし、これまでの運転データが残されている場合には、データから沈澱処理の運転方法を分析し、形式知化することが技術継承の意味からも有効である。

本稿では、以下の統計的アプローチによりクリプト対策前後の運転方法の変更内容の把握を試みる。具体的には、凝集沈澱処理プロセスに着目し、入力としての原水条件に対して、出力としての沈澱水濁度がどのように確保されているか、それはどのような制御により行われているかを明らかにする。まず、クリプト対策前後において出力である沈澱水濁度の改善度合いを把握した上で、浄水場の記録データに対して相関分析を行い、入力と出力並びに制御との関連を整理する。つぎに、入力項目について主成分分析^{9),10),11)}を行い、原水条件による分類（グループ化）を行う。原水条件のグループにおけるクリプト対策前後の沈澱水濁度の達成状況から、入力と出力の関連を把握する。そして、クリプト対策前後の運転方法の変更内容について回帰分析¹²⁾を適用して入力に対する制御との関連を把握する。その際、入力となる原水条件の分類については、主成分分析による結果と凝集効果との関連性を確認した上で、凝集効果の分類におけるクリプト対策前後の達成状況を分析する。

2. 沈澱水質の特性把握

本稿では、クリプト対策（1997年度開始）を行った前後のデータが得られるN浄水場を対象とする。当時の技術職員が退職したため、クリプト対策前後の経験のヒアリングは不可能であったが、沈澱水濁度の達成状況について、データを表-1に示す3分類^{13),14)}で整理し、図-1を得ることができた。図-1より、当該浄水場では、クリプト対策後に沈澱水濁度が明らかに改善されている。凝集沈澱処理の制御要因としては、凝集剤、凝集補助剤、

表-1 沈澱水濁度の分類^{13),14)}

分類名称	分類基準	備考
優	～1.0度	2.0度、1.0度：クリプト対策前、後の沈澱池出口における転管 理目標値
良	1.1～2.0度	
劣	2.1度～	

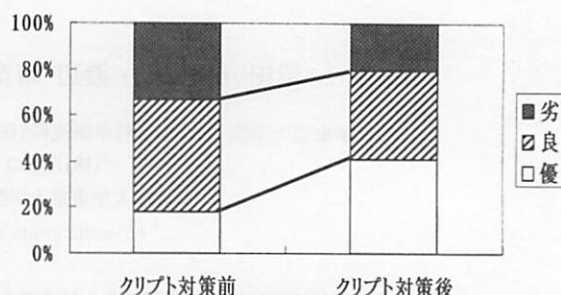


図-1 沈澱水濁度の変化

攪拌強度並びにフロック形成が挙げられるが、N浄水場では攪拌、フロック形成の運転を一定としている。凝集剤としてポリ塩化アルミニウム（PAC）を、凝集補助剤として消石灰を使用している。

(1) 沈澱水濁度との関連項目の把握

凝集沈澱処理プロセスにおける、原水条件を入力、薬品注入等を制御、沈澱水水質を出力としてデータ項目を整理し、表-2に示す。なお、河川水質に影響を与える気象情報を運転環境要因として整理している。データは1990年度から2000年度の11年間の日データである。

表-2に示す11項目のデータを用いて相関分析を行った。ここで、t分布を用いた相関係数の有意性の検定¹⁵⁾によれば、本稿におけるサンプル数4,018の場合、有意水準95%に対する相関係数は0.031となっていることから、相関係数0.1以上の項目間には統計的に相関があると判断した。この結果を基に、出力となる沈澱水濁度と各項目との相対的な関係を図-2に整理した。図-2では、沈澱水濁度との相関係数の絶対値を縦軸にとり、データ

表-2 使用データ項目

要因	項目名	データ所在
入力	原水濁度、原水 pH	記録データ
	原水アルカリ度、原水水温	
出力	沈澱水濁度、沈澱水 pH	
制御	処理水量、PAC 注入率 消石灰注入率	
運転環境	降水量、気温	気象データ

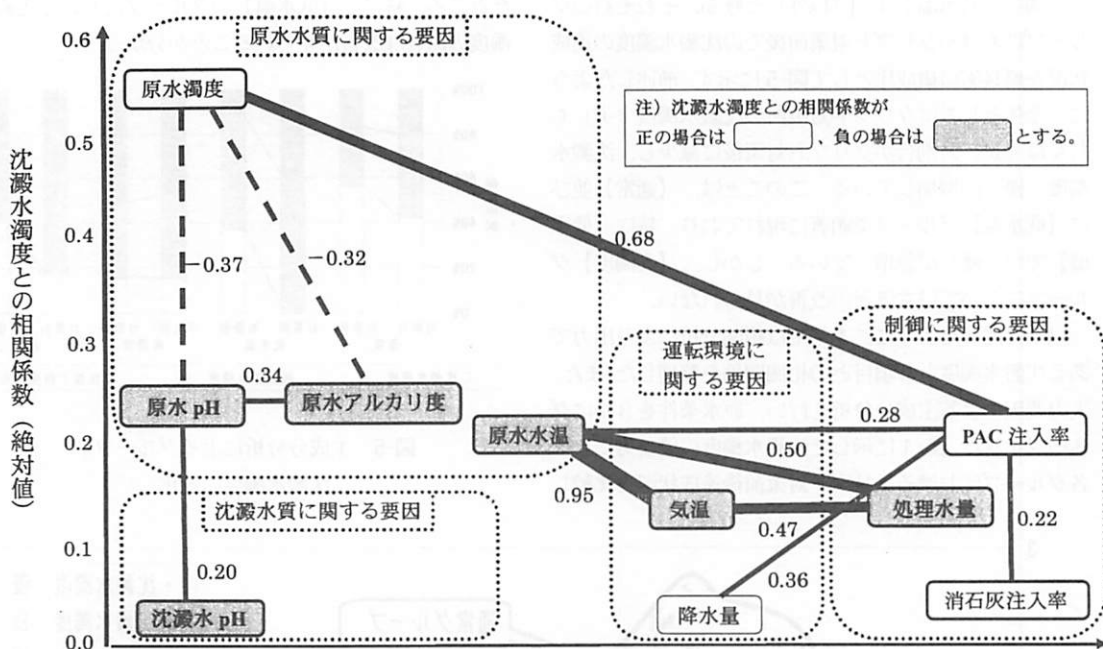


図-2 沈澱水濁度との相関関係図

項目間の相関係数により関連付けを行っている。また、表-2で分類した要因により「原水水質（入力）に関する要因」、「沈澱水質（出力）に関する要因」、「制御に関する要因」並びに「運転環境に関する要因」の4つの要因に分類して表示している。図-2より、沈澱水濁度と相関が最も高い項目は原水濁度であり、つぎに高い項目は原水 pH、原水アルカリ度、PAC 注入率、原水水温である。また、これらの水質項目間に相関がある。

(2) 原水条件の類型化とクリプト対策前後の沈澱水濁度との関連

ここでは、入力と出力をパターン化し、どのような入力パターンにおいて、どのような出力パターンを得ているかを把握する。

まず、表-2に示した入力のパターン化をするため(1)で得られた要因より「原水水質に関する要因」として4つの水質項目を選定した。これらの水質項目を基に主成分分析を行い、得られた主成分の固有値を表-3に、因子負荷量を図-3に示す。表-3より第2主成分までの累積寄与率が68.37%であり、第1、2主成分でサンプルの説明力がある。また、図-3より第1主成分は原水濁度もしくは原水アルカリ度を表す軸、第2主成分は原水水温を表す軸といえる。

つぎに、得られた第1、2主成分因子得点の散布を図-4に示す。サンプル数がほぼ均等となるウォード法¹⁶⁾によるクラスタリングを行った結果、図-4に示す3つのグループに分けられた。これらは、第1、2主成分の軸の意味づけより【高濁度】、【低水温】並びに【通常】

表-3 固有値の計算結果

主成分	固有値	寄与率	累積寄与率
第1主成分	1.72	42.95%	42.95%
第2主成分	1.02	25.42%	68.37%
第3主成分	0.68	16.88%	85.25%
第4主成分	0.59	14.75%	100.00%

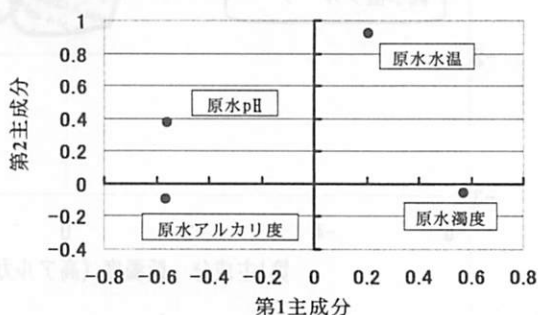


図-3 因子負荷量の散布図

（高濁度、低水温グループ以外）と呼ぶ。それぞれのグループにおけるクリプト対策前後での沈澱水濁度の達成状況を優良劣の構成比として図-5に示す。前述したように、全体としてはクリプト対策前の沈澱水濁度「劣」もしくは「良」の割合がクリプト対策後に減少し、沈澱水濁度「優」が増加している。このことは、【通常】並びに【低水温】グループで顕著に現れており、特に【低水温】では「優」が急増している。しかし、【高濁度】グループにおいてはさほどの改善が見られない。

以上に述べたように、本章では相関分析により出力である沈澱水濁度と各項目との相関関係を整理した。また、入力要因による主成分分析を行い、原水条件を3つにグループ化した。表-1に示した沈澱水濁度の優良劣により、各グループにおけるクリプト対策前後達成状況を比較し

たところ、特に、【低水温】のグループにおいて沈澱水濁度の顕著な改善が見られることが分かった。

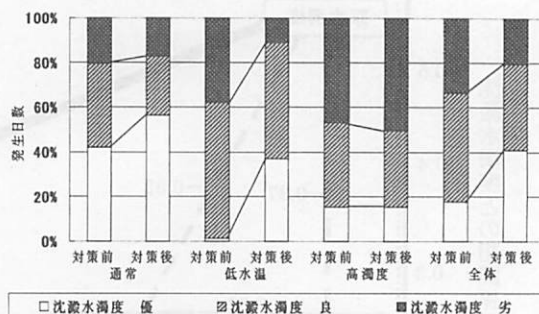


図-5 主成分分析によるグループ別沈澱水濁度の変化

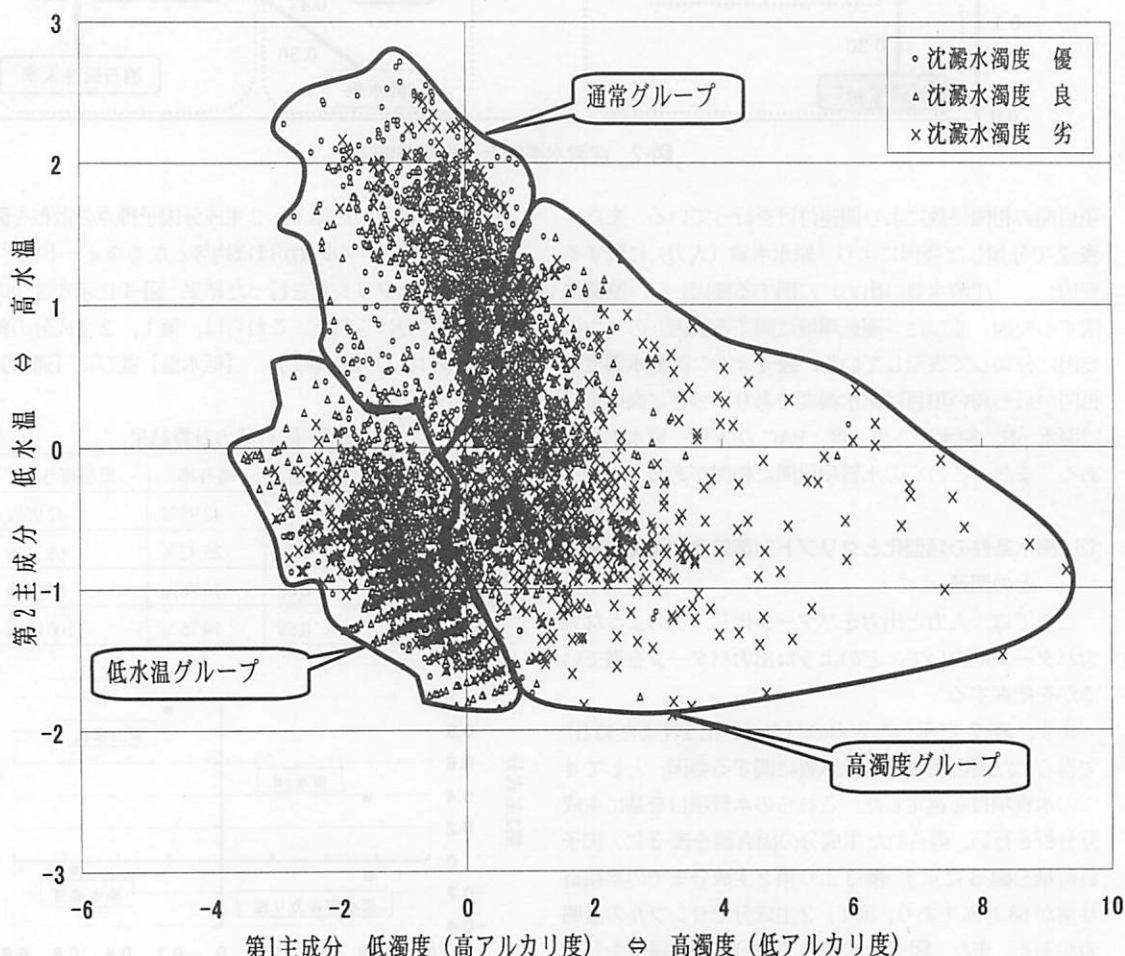


図-4 主成分因子得点の散布

3. クリプト対策と運転方法との関連

ここでは、2. で得られた原水条件によってクリプト対策前後の沈澱水濁度の達成状況が異なっていることがどのような運転方法によるものかを検討する。その際、2. で把握した主成分分析による原水条件の分類を、凝集効果の視点から再検討する。運転方法の内容は、入力に対する制御の関係式としてモデル化し、その係数の違いとして解釈する。

凝集効果としての検討対象ケースを設定する。PACの凝集効果に対する原水アルカリ度、原水水温の影響については表-4に示す関係が知られている¹⁷⁾。ここで、表-4に示す分類要素の組み合わせによる4つの凝集効果分類と2.の主成分分析のグループとの関係を表-5に示す。表-5より、【通常】と【低水温】のグループがそれぞれ『通常アルカリ度、通常水温』と『通常アルカリ度、低水温』の分類に対応している。一方、【高濁度】のグループは各分類に分散している。このように、2.の主成分分析で検討した入力グループと凝集効果の視点からのグループとの対応がN浄水場では概ね取れていることを確認した。以下では、凝集効果の分類にしたがって検討を行う。

表-5の分類による沈澱水濁度の達成状況を整理すると図-6となる。図-6のクリプト対策前後の沈澱水濁度の達成状況を凝集効果の視点から見ると、『低アルカリ度、通常水温』を除く3つの分類で改善されていることが分かる。このうち、『通常アルカリ度、低水温』において顕著な改善が図られている。また、『低アルカリ度、通常水温』の分類では運転方法に課題を残していることを示していると考えられる。

つぎに、表-5に示した凝集効果の4分類においてクリプト対策前後の運転方法の変更内容を回帰分析により把握する。その際、入力としての原水濁度、制御としてのPAC注入率の関係を線形回帰式としてモデル化し、運転方法の変更を勾配とY切片の変化として把握する。

表-4 凝集効果の分類¹⁷⁾

水質項目	分類要素	分類基準	凝集効果
原水アルカリ度	通常アルカリ度	20mg/l以上	良い
	低アルカリ度	20mg/l未満	悪い
原水水温	通常水温	10℃以上	良い
	低水温	10℃未満	悪い

表-5 主成分分析によるグループと凝集効果の分類とのサンプル構成比

凝集効果 分類			主成分分析によるグループ		
			【通常】	【低水温】	【高濁度】
通常アルカリ度	通常水温	(a)	94%	1%	45%
	低水温	(b)	4%	99%	32%
低アルカリ度	通常水温	(c)	2%	0%	7%
	低水温	(d)	0%	0%	15%
計			100%	100%	100%

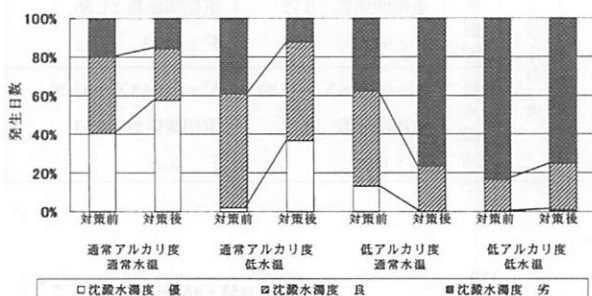


図-6 凝集効果の分類による分類別沈澱水濁度の变化

$$Y = aX + b$$

ここで、

X: 原水濁度 (度)

Y: PAC注入率 (mg/l)

a: 勾配

b: Y切片

とする。

得られた4分類のクリプト対策前後の回帰式を表-6に示す。また、クリプト対策前後の結果を図-7(a)~(d)にそれぞれ示す。なお、各図にはクリプト対策後の回帰式の95%信頼区間を示している。表-6を見ると、F値などから、回帰式は統計的に有意となっている。また、各図に示した95%信頼区間の幅に多くの実測値が含まれており、信頼区間から見ても各回帰式が有意であることが分かる。

まず、クリプト対策前後それぞれにおける分類間の係数の違いについて考察する。表-6よりクリプト対策前の葉注運転方法について、「通常アルカリ度」の2分類を見ると、勾配が同じ値となっているが、「通常水温」のY切片が「低水温」より大きい。このことは、「低アル

表-6 分類別回帰式一覧

分類	クリプト対策前	クリプト対策後
通常アルカリ度	通常水温 (a) $Y=0.2142X+37.39$ 重相関係数: 0.80 F: 1899.6	通常水温 $Y=0.2185X+45.15$ 重相関係数: 0.71 F: 573.8
	低水温 (b) $Y=0.2148X+30.54$ 重相関係数: 0.78 F: 2031.3	低水温 $Y=0.0956X+48.24$ 重相関係数: 0.41 F: 143.0
低アルカリ度	通常水温 (c) $Y=0.1041X+35.46$ 重相関係数: 0.75 F: 93.5	通常水温 $Y=0.1814X+36.73$ 重相関係数: 0.86 F: 149.3
	低水温 (d) $Y=0.1046X+33.89$ 重相関係数: 0.77 F: 169.2	低水温 $Y=0.0468X+43.70$ 重相関係数: 0.53 F: 40.6

カリ度」の2分類においても同様である。また、「通常水温」の2分類におけるアルカリ度の差異について見ると、「通常アルカリ度」の勾配が「低アルカリ度」より大きい。このことは、「低水温」の2分類においても同様である。

つぎに、クリプト対策後について見てみる。「通常アルカリ度」の2分類においては、「通常水温」の勾配が「低水温」より大きい、Y切片は小さい。このことは、「低アルカリ度」の2分類においても同様である。また、「通常水温」の2分類におけるアルカリ度の差異について見ると、「通常アルカリ度」の勾配とY切片が「低アルカリ度」より大きい。このことは、「低水温」の2分類においても同様である。

これより、クリプト対策前では原水アルカリ度の差異に着目し、クリプト対策後では原水アルカリ度と原水水温の差異に着目した薬注運転を行っていることが分かる。

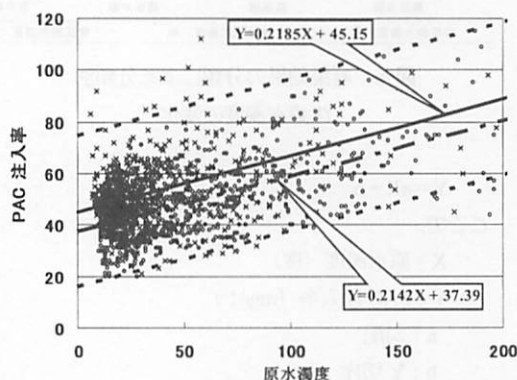


図-7 (a) 『通常アルカリ度, 通常水温』の回帰式

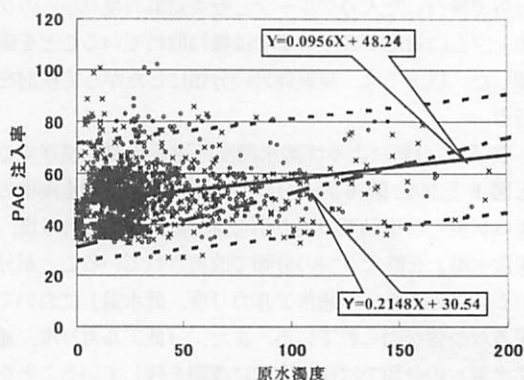


図-7 (b) 『通常アルカリ度, 低水温』の回帰式

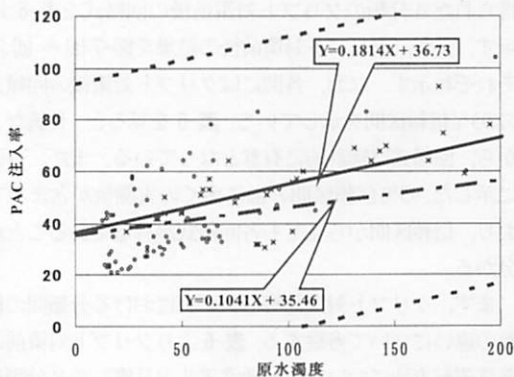


図-7 (c) 『低アルカリ度, 通常水温』の回帰式

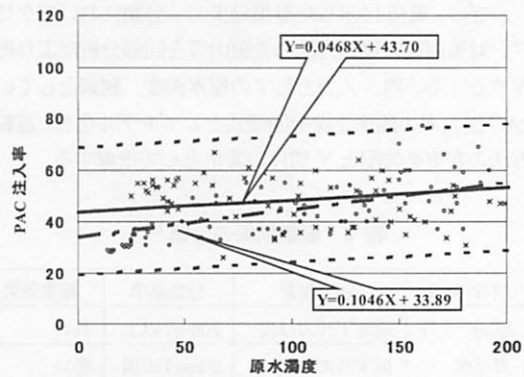


図-7 (d) 『低アルカリ度, 低水温』の回帰式

凡	○ クリプト対策前 実測値	— クリプト対策前 推定値	
例	× クリプト対策後 実測値	- - - クリプト対策後 推定値	 クリプト対策後 信頼区間

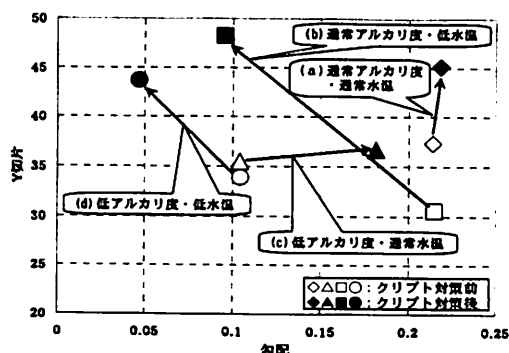


図-8 回帰式の勾配と Y 切片の関連

さらに、各分類内でのクリプト対策前後の係数の違いについて考察する。図-7 (a) の『通常アルカリ度、通常水温』においては、クリプト対策前後で同様な勾配となっており、クリプト対策後に Y 切片が大きくなっている。図-7 (b) の『通常アルカリ度、低水温』では、クリプト対策後に勾配が小さくかつ Y 切片が大きくなっている。図-7 (c) の『低アルカリ度、通常水温』では、クリプト対策後に勾配が大きくなり Y 切片はクリプト対策前と同様である。図-7 (d) の『低アルカリ度、低水温』では、図-7 (b) の『通常アルカリ度、低水温』と同様にクリプト対策後に勾配が小さくかつ Y 切片が大きくなる薬注運転方法に変更している。すなわち、クリプト対策後の薬注運転方法の変更は、『通常水温』においては勾配もしくは Y 切片を大きくする注入率の設定変更を行っている。一方、『低水温』においては勾配を小さくし Y 切片を大きくする注入率の設定変更をし、クリプト対策前後の回帰直線が交差している特徴を示している。これらの特徴を整理したものを、図-8 に示す。

以上のことから、『低水温』の2分類では、クリプト対策前に比べて対策後にはいずれも低濁度時の注入率を増やしており、その結果として沈澱水濁度の改善効果を得ていることが分かった。とくに、『通常アルカリ度、低水温』では飛躍的な改善効果が得られている。一方、『通常水温』の2分類のうち、『低アルカリ度、通常水温』では、対策前後において低濁度時の注入率は変えずに高濁度時の注入率を増やしているが、残念ながら、期待された改善効果が得られていない。『通常アルカリ度、通常水温』では、すべての濁度範囲にわたって注入率を増やしており、顕著な改善効果が得られていることが判明した。

4. おわりに

本稿では、凝集沈澱プロセスの濁度管理について、沈澱水質の特性を把握するとともに、クリプト対策前後における沈澱水濁度管理方法の分析を試みた。以下に、得られた主要な結果を述べる。

- 1) 相関分析の結果、相関係数の相対的大きさに着目した関連図を作成することにより、凝集沈澱プロセスの出力となる沈澱水濁度に影響する要因間の関連を把握することができた。
- 2) 主成分分析法により、入力となる原水条件のグループ化を行い、沈澱水濁度の優良劣の構成比による達成状況と対比して分析を行った。特に、クリプト対策後に【低水温】のグループにおいて、沈澱水濁度の達成状況が顕著に改善されていることが分かった。
- 3) 凝集剤の凝集効果に着目して PAC 注入率の回帰分析を行った結果、クリプト対策前後の運転方法の変更を回帰式の勾配、Y 切片の差異により明示化することが可能であることを示した。特に、クリプト対策後は原水水温により異なる運転方法に変更していることが分かった。
- 4) 上述した 1) から 3) で用いた統計的アプローチにより、運転管理の経験知が集約した結果と見ることでできるデータから、形式知化することが可能であることを示した。この統計的アプローチは浄水場における他の運転方法の改善に有効な手法となろう。

本稿では、職員が保有する経験知のヒアリングが難しい場合に、データを利用した統計的アプローチによる形式知化の方法を試みた。今後、職員からの経験をヒアリング等により形式知化していく方法と併用することが確実な技術継承を可能にするものと考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり多大な助言を頂いた首都大学東京大学院都市環境科学研究科稲貝とよの教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：水道ビジョン（平成 20 年 7 月改訂），pp.41-44, 2008.
- 2) 沼田篤男，渡辺晴彦，小泉明：維持管理のための浄水場水質管理特性に関する一考察，環境工学研究論文集 pp.579-586, 2008.

- 3) Michael Polanyi, 高橋勇夫訳：暗黙知の次元-THE TACIT DIMENSION-, 筑摩書房, 2006.
- 4) Medema G., Teunis P., Blokker M., Deere D., Davison A., Charles P., and Loret J.F.: *Cryptosporidium* -WHO Guidelines for Drinking Water Quality, EHC *Cryptosporidium* draft 2, p.112, 2006.
- 5) 厚生省生活衛生局：水道におけるクリプトスポリジウム暫定対策指針, 厚生省生活衛生局水道環境部長通知平成8年10月4日付け衛水大48号, 1996.
- 6) 仁上隆, 吉浦隆一：経済的薬注効果の統計的考察, 第33回全国水道研究発表会講演集, pp.199-201, 1982, (4-10)
- 7) 原敬一：浄水処理性へ影響を及ぼす設計操作因子の統計解析, 第59回全国水道研究発表会講演集, pp.246-247, 2008, (4-59)
- 8) (財)水道技術研究センター：安全でおいしい水を目指した高度な浄水処理技術の確立に関する研究(e-WaterⅡ) 成果報告書集(2/3), pp.IV35-50, 2008.
- 9) 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正：多変量解析(改訂版), 日科技連, pp.159-258, 1983.
- 10) 阿久津武彦, 萩原良巳, 小泉明, 中川芳一, 沼田篤男：水需要予測のための地域分析, 第27回全国水道研究発表会講演集, pp.49-51, 1976.
- 11) 林野, 横田治雄, 古米弘明, 藤原正弘：水道原水の水質類型と総合汚濁指標に関する研究, 水道協会雑誌, Vol.77, No.11, pp.15-24, 2008.
- 12) 山崎公子, 稲員とよの, 小泉明：大学内実験廃水処理施設におけるVOC除去に関する研究, 環境工学研究論文集, pp.187-193, 2004.
- 13) (社)日本水道協会：水道維持管理指針, p.83, 1982.
- 14) (社)日本水道協会：水道維持管理指針, p.874, 2006.
- 15) 米谷栄二編：土木計画便覧, 丸善, pp.589-590, 1976.
- 16) 田中豊, 脇本和昌：多変量統計解析法, 現代数学社, pp.238-244, 1985.
- 17) 前掲14), pp.279-280.

(2009.5.22 受付)

A Study on Statistical Approach to Make an Explicit Knowledge of Effective Control Management of Sedimentation System

Atsuo NUMATA¹, Haruhiko WATANABE², Akira KOIZUMI³ and Masayuki MORI¹

¹Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University /
Nihon Suido Consultants, Co., Ltd.

²Central Research Institute, Nihon Suido Consultants, Co., Ltd.

³Dept. of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University

Securing talented engineers and technological succession are indispensable for waterworks business to make a sustainable service. This is a modern problem of the waterworks. It is necessary to share experimental wisdom saved by individuals as explicit knowledge among staffs for the technological succession in order to improve and maintain the operation management.

This paper confirmed that statistical approach could express experimental wisdom concerning chemical feeding control in sedimentation basin. That is, correlative analysis extracts the factor which explains sedimentation processing water turbidity. Principal component analysis shows several patterns of quality of raw water which have different level of the sedimentation processing water turbidity. In addition, regression analysis clarified that chemical feeding rate against raw water turbidity in the control operation differs from water temperature before and after introducing cryptosporidium measures.